

Научные статьи

УДК 549.3+553.2+552.323.6

МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ И ЗОЛОТА В ПОРОДАХ ОФИОЛИТОВОГО КОМПЛЕКСА П-ОВА КАМЧАТСКИЙ МЫС

© 2017 Д.П. Савельев, Т.М. Философова

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
683006; e-mail: saveliev@kscnet.ru*

В статье представлены результаты исследований различных пород офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс, а также аваруита из шлиховых проб из водотоков, дренирующих гипербазитовый массив г. Солдатской. На сканирующем электронном микроскопе в сульфидных глобулах из пикритов, в лерцолитах, оливиновых клинопироксенитах, хромититах, а также в зернах аваруита и самородной меди из шлиховых проб определены микровключения платиноидов и золота. В сульфидах из пикритов установлены микровключения Au, Au+Ag, Pd₂Sn, Pt, а также комплексные включения, содержащие перечисленные элементы и соединения, иногда с примесью As. Состав микровключений в оливиновых клинопироксенитах: Pt+Pd+Hg+Te+Cu±Ag, Cu+Pd+Pt+Te, Pt+Pd+Au+Ag+Te+Cu, As+Ir+Pt+Rh+Ru. Также разнообразны микровключения в аваруитах, среди них обнаружено зерно, «нашпигованное» микровключениями осмия. Предложена модель, связывающая платиноносность офиолитового комплекса Камчатского Мыса с его геодинамическим положением. Комплексный состав микровключений элементов платиновой группы в породах объясняется влиянием мантийного плюма и возможной примесью материала земного ядра в источниках магм.

Ключевые слова: элементы платиновой группы, офиолитовый комплекс, Камчатка, сульфиды, аваруит.

ВВЕДЕНИЕ

Офиолитовый комплекс п-ова Камчатский Мыс (п-ов Камчатский) — видимо, самый изученный из ультрамафических массивов Камчатки (рис. 1). Комплекс в целом и отдельные его части описаны в десятках статей и в нескольких диссертациях. Однако многие вопросы, касающиеся строения комплекса и его происхождения, являются спорными. Одним из таких вопросов является минерагеническая перспектива южной части п-ова Камчатский Мыс. Наиболее полная характеристика пород комплекса приведена в записке к листу геологической карты м-ба 1:200 000 (Бояринова и др., 2007) и в статье М.Ю. Хотина и М.Н. Шапиро (2006). С минерагенической точки зрения гипербазиты п-ова Камчатский Мыс, которые являются одной из частей офиолитового комплекса, рассмотрены

в ряду других гипербазитовых массивов Восточной Камчатки в диссертации Е.Г. Сидорова (2009).

Проблема источников элементов платиновой группы (ЭПГ) в магматических комплексах и месторождениях мантийного генезиса находится на передовом крае петрологических исследований и построений. Интерес геологов, петрологов и геохимиков к платине и другим ЭПГ заметно вырос именно в последние годы. Некоторые журналы посвятили этой теме специальные выпуски с подробными обзорами и статьями по отдельным проблемам ЭПГ (Brenan, 2008; Mungall, Naldrett, 2008; Palme, 2008 и др.) или высоко сидерофильных элементов (ЭПГ + Re + Au) (Aulbach et al., 2016; Barnes, Ripley, 2016; Day, 2013; Lorand, Luguet, 2016 и др.). ЭПГ и другие сидерофильные элементы используются не только для моделирования петрологиче-

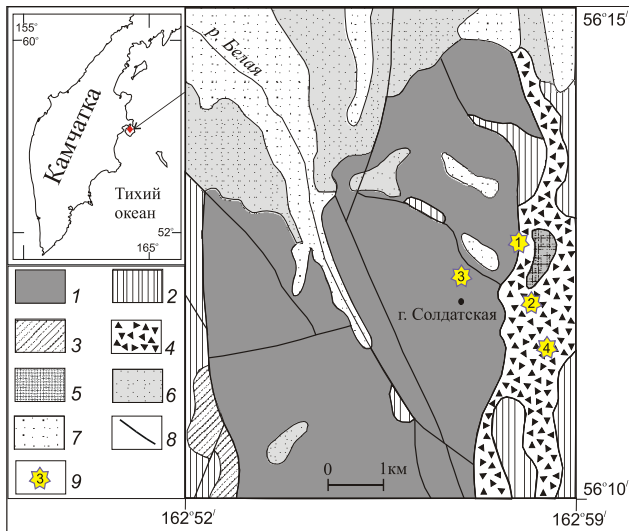
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ
РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рис. 1. Геологическая карта района исследований по (Бояринова, 2007): 1 — дуниты и гарцбургиты габбро-перидотитового комплекса; 2 — вулканогенно-кремнистые образования смагинской свиты; 3 — терригенные образования пикежской свиты; 4 — серпентинитовый меланж; 5 — блоки амфиболитов; 6 — плиоцен-эоплейстоценовые образования ольховской свиты; 7 — рыхлые четвертичные образования различного генезиса; 8 — разрывные нарушения; 9 — места отбора образцов, изученных авторами: 1 — пикриты, 2 — хромитит, 3 — лерцолиты, 4 — оливиновые клинопироксениты. На врезке стрелкой показано расположение участка исследований.

ских процессов, но и для решения вопросов о формировании и эволюции Земли и других планет (Walker, 2016).

Мантийные перидотиты различных офиолитовых комплексов являются одним из объектов, который активно изучается на предмет содержаний ЭПГ. Накоплено достаточно много таких данных, очень хороший обзор их сделан Дж.-П. Лорандом с соавторами (Lorand et al., 2013). Авторы приходят к выводу, что большинство изученных лерцолитов из литосферной мантии подверглось рефертилизации (вторичному обогащению) путем просачивания через них растворов, богатых сульфидами (несущими ЭПГ, в основном Pt и Pd). Из-за влияния этого процесса некорректно использовать данные по содержанию ЭПГ в мантийных перидотитах для идентификации источников, однако сам процесс рефертилизации мог быть связан с поступлением обогащенного материала мантийного плюма.

В данной статье мы представляем результаты исследований различных пород офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс, а также аварита из шлиховых проб из водотоков, дренирующих гипербазитовый массив южной части полуострова.

В южной части п-ова Камчатский Мыс развиты преимущественно образования мелового возраста, включающие гипербазиты, габброиды, альб-сеноманские вулканогенно-кремнистые отложения смагинской свиты и турон-кампанские терригенные отложения пикежской свиты (Бояринова и др., 2007). Некоторые исследователи трактуют возрастные взаимоотношения по-другому (Хотин, Шапиро, 2006): яшмы, известняки, базальты и гиалокластиты альб-сеноманского возраста (смагинская ассоциация) залегают в виде олистолитов и тектонических пластин среди туфокремнистых отложений сантон-кампанского возраста. Мантийные перидотиты, габбро, долериты, базальты, гиалокластиты и карбонатно-кремнистые породы объединяют в офиолитовый комплекс (Хотин, Шапиро, 2006). Среди базальтов описаны породы различных геохимических типов, в том числе толеитовые базальты типа MORB, ферробазальты, обогащенные толеиты и щелочные базальты типа OIB (Портнягин и др., 2005; Савельев, 2003, 2004; Федорчук и др., 1989; Portnyagin et al. 2008). Для базальтов комплекса на основе геохимических, минералогических и изотопных исследований доказана связь с меловой деятельностью Гавайского мантийного плюма (Портнягин и др., 2005; Portnyagin et al., 2008, 2009).

Гипербазиты, представленные в основном в различной степени серпентинизированными гарцбургитами и дунитами с незначительными развитием пироксенитов и лерцолитов, слагают массив г. Солдатской (рис. 1), а также развиты в маломощных тектонических пластинах, чешуях и зонах серпентинитового меланжа в южной части п-ова Камчатский Мыс (Бояринова и др., 2007). В составе массива присутствуют локальные обогащенные участки, сложенные оливиновыми вебстеритами, несущими сульфидно-самородную минерализацию с пентландитом, аваритом, самородной медью, платинистой медью и золотом (Новаков и др., 2014). На основании данных по содержанию редкоземельных элементов и стронция в клинопироксенах из гарцбургитов Камчатского Мыса В.Г. Батанова с соавторами (2014) делают вывод о том, что экстремальное обеднение мантийных перидотитов Камчатского Мыса базальтовым компонентом осуществлялось в сегменте срединного хребта, расположенного вблизи горячей точки.

В зоне меланжа, обрамляющей с востока массив г. Солдатской, развиты блоки пород смагинской свиты и амфиболитов (Осипенко и др., 2005), там же найдены пикриты (Савельев, 2014). Меловые комплексы несогласно перекрыты

морскими плиоцен-эоплейстоценовыми образованиями ольховской свиты и четвертичными отложениями различного генезиса (Бояринова и др., 2007).

Учитывая все данные, накопленные к настоящему времени по разным частям офиолитовой ассоциации п-ова Камчатский Мыс (гипербазиты, переходный комплекс, габбро, комплекс параллельных даек, базальты различных геохимических типов, пикриты, осадочные породы), ее можно отнести к офиолитам Р-типа (плюмового типа) (Dilek, Furner, 2014).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужила коллекция образцов, собранная Д.П. Савельевым за несколько лет полевых работ на п-ове Камчатский Мыс, а также шлиховые пробы, отобранные в 2016 г. Из образцов хромититов, лерцолитов и оливинных вебстеритов были изготовлены полированные пластины, которые изучались на рудном микроскопе и, затем, на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) VEGA-3 с ЭДС X-MAX в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Пикриты изучались в полированных пластинах, также анализировались монофракции различных минералов, выделенные из дробленных проб пикритов. Из нескольких образцов было выделено 220 зерен сульфидов размером 50–200 мкм, зерна были собраны в шашку, залиты эпоксидной смолой, отполированы и изучены также на СЭМ. Шлиховые пробы были разделены на магнитную и немагнитную фракции, затем из магнитной фракции двух проб было вручную выделено ~2100 зерен аваруита размером 50–400 мкм. Было выделено также 30 зерен самородной меди (из немагнитной фракции), иногда в сростании с аваруитом (из магнитной фракции шлиха). Часть зерен (~900) были залиты эпоксидной смолой и отполированы, остальные зерна были помещены на электропроводящий скотч на металлическую пластину. Далее все зерна были просмотрены на СЭМ на предмет наличия в них микровключений платиноидов, золота и интерметаллидов. Было получено ~1400 спектров (точечных анализов) аваруитов, меди и различных микровключений при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе на Ni 700 пА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Практически все изученные породы содержали микровключения благородных металлов. Количество и состав этих микровключений связан с составом вмещающей матрицы. Рассмо-

трим результаты микрозондовых исследований по группам пород.

Сульфиды из пикритов. Плагиоклазовые пикриты распространены в зоне серпентинитового меланжа к востоку от гипербазитового массива г. Солдатской (Савельев, 2014) (рис. 1). Сульфиды в пикритах наблюдаются в виде сферических расплавных включений во вкрапленниках оливина и в виде каплевидных или бесформенных выделений размером до 0.3 мм в основной массе. Было изучено 220 зерен сульфидов, около 50 зерен содержали выделения благородных металлов размером 0.5–1.5 мкм, которые отличаются на фоне сульфидов более ярким свечением при сканировании в обратно рассеянных электронах. Всего найдено ~90 таких выделений благородных металлов и интерметаллидов (Савельев, Философова, 2015).

В основном зерна сульфидов содержали 1–2 микровыделения, но одно из зерен содержало 14 микровыделений золота и паоловита (рис. 2а). Среди этих микровыделений преобладают зерна паоловита (Pd_2Sn), $\text{Au}+\text{Ag}$ в разных пропорциях (как с преобладанием серебра, так и с преобладанием золота), определены также включения Au без примеси Ag и комплексные выделения состава $\text{Pd}+\text{Sn}+\text{Au}\pm\text{Ag}\pm\text{As}$.

В других сульфидных зернах некоторые выделения имеют более сложный состав: $\text{Pd}+\text{Sn}+\text{Pt}+\text{Au}+\text{Ag}+\text{As}$ (рис. 2б). Были найдены также единичные выделения Pt и $\text{Pt}+\text{Au}$.

Хромититы. При проведении маршрутов в 1994 г. в рамках ГДП-200 (Геологическое доизучение площадей масштаба 1: 200 000) в зоне меланжа к востоку от г. Солдатской был найден обломок хромитита, состоящий из зерен хромита (70%) и серпентина с хлоритом (30%). Зерна хромита размером 0.5–2 мм погружены в хлорит-серпентиновый матрикс, хлорит представлен хромовой разновидностью (кочубеитом) с содержанием Cr_2O_3 до 9.7 вес.%. Порода несет следы метаморфических преобразований, что, кроме замещения серпентина хлоритом, выражено в частичном замещении хромистой шпинели почти безглиноземистым хромитом и развитии микропрожилков и, редко, порфиробластов хромистого граната — уваровита (до 21 вес.% Cr_2O_3).

При изучении хромитита на СЭМ в одном из зерен хромита было найдено микровключение лаурифта размером 2 мкм с составом $(\text{Ru}_{0.79}\text{Os}_{0.17}\text{Ir}_{0.04})\text{S}_2$.

По данным химико-спектрального анализа, в хромититах из зоны меланжа в верховьях р. Белой (рис. 1) суммарное содержание платиноидов достигает 0.45 г/т (0.15 г/т Pt и 0.3 г/т Pd) (пункт минерализации IV-4-27 по (Бояринова и др., 2007)).

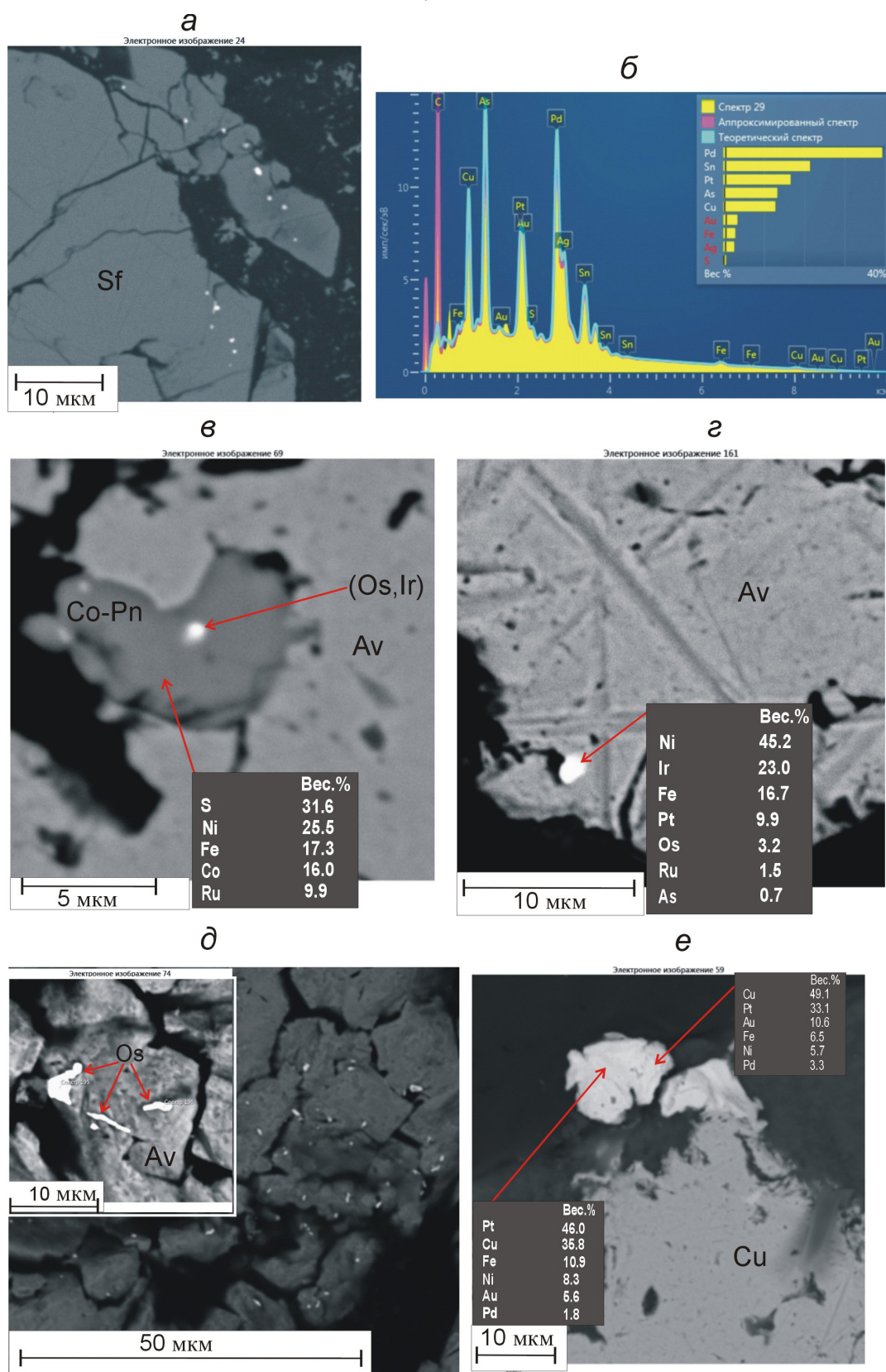


Рис. 2. Составы микровключений платиноидов по данным анализа на сканирующем электронном микроскопе: *а* — микровыделения золота и паоловита (Pd_2Sn) в сульфиде (здесь и далее фото в обратно рассеянных электронах); *б* — пример спектра, полученного при анализе микровключения сложного состава почти без захвата сульфида; *в* — во вмещающем аварите включение кобальтпентландита, обогащенного Ru, с микровключением иридиевого осмия; *г* — микровключение сложного состава (Ir+Pt+Os+Ru+/-As) в аварите; *д* — микровключения осмия в зерне аварита; *е* — микровключение сложного состава на краю зерна самородной меди. Sf — сульфид, Av — аварит, Cu — самородная медь, Co-Pn — кобальтпентландит.

Лерцолиты. Гипербазитовый массив г. Солдатской сложен преимущественно гарцбургитами и дунитами, в небольшом количестве отмечены лерцолиты (Бояринова и др., 2007). По данным В.Г. Батановой с соавторами (2014), шпинелевые лерцолиты залегают среди шпинелевых гарцбургитов на северном и северо-восточном отрогах г. Солдатской. Исследованный нами образец лерцолита отобран в 500 м к северу от вершины г. Солдатской. Порода состоит из оливина (до 60%), клинопироксена (25%), ортопироксена (15%) и хромистой шпинели (2–3%), минералы практически свежие, серпентин образует в породе редкие микропрожилки. В качестве аксессуаров наблюдаются зерна сульфида (пентландита), иногда с выделениями самородной меди или каемками аваруита. Самородная медь содержит примеси железа и никеля (2–3.7 вес.% и 1.5–2.9 вес.% соответственно), в трех анализах меди была выявлена примесь Pd (максимально — 2.2 вес.%). Кроме этого, в зерне оливина вблизи выделения пентландита найдено микровыделение медистой ферроплатины размером 1.5 мкм. Других включений платиноидов в изученном образце нами не обнаружено.

Оливиновые клинопироксениты. В гипербазитовом массиве г. Солдатской вебстериты и клинопироксениты отмечены в небольшом количестве в неясном залегании (Бояринова и др., 2007). В.Г. Батанова с соавторами (2014) при детальном петрографическом картировании массива отмечали клинопироксеновые оторочки и гнезда по краям дунитовых тел, а также прожилки до 2 см в лерцолитах. В 2016 г. в зоне серпентинитового меланжа к востоку от массива г. Солдатской Д.П. Савельевым были обнаружены элювиальные высыпки глыб кумулятивных пород от клинопироксенитов до верлитов, видимо, маркирующие тектонический блок размером ~140 м (ширина выхода на горизонтальной поверхности на перевале). Породы сложены клинопироксеном с переменным количеством оливина, в некоторых глыбах отмечена вкрапленность сульфида — до 1–2%. Изученный на СЭМ образец имеет среднезернистую структуру, содержит 60% клинопироксена и 40% частично серпентинизированного оливина, аксессуарные хромшпинелиды и сульфиды (пирротин и кобальтсодержащий пентландит (до 6 вес.% Co)), а также выделения самородной меди. Внутри сульфидных выделений или вблизи них в серпентине обнаружены четыре микровключения платиноидов максимального размера 2 × 5 мкм. Состав микровключений очень разный: Pt+Pd+Hg+Te+Cu±Ag, Cu+Pd+Pt+Te, Pt+Pd+Au+Ag+Te+Cu, As+Ir+Pt+Rh+Ru. Также обнаружено одно микровключение состава Au+Cu+Ag внутри зерна оливина.

Находки микровключений сложного состава в оливиновых клинопироксенитах хорошо согласуются с составом выявленной ранее Р.М. Новаковым с соавторами золото-платиноидно-медно-никелевой минерализации в оливиновых вебстеритах в самом гипербазитовом массиве на левом борту р. Белой (Новаков и др., 2014, 2015). В этих породах описаны самородное золото, твердые растворы Cu-Pt, сложные фазы с Te, Bi и Pd (Новаков и др., 2014). По данным химико-спектрального анализа в пробах было установлено до 0.148 г/т золота и 0.6 г/т платиноидов (0.3 г/т Pt и 0.3 г/т Pd) (пункт минерализации IV-4-20 по (Бояринова и др., 2007)).

Аваруиты из шлиховых проб. Аваруит является очень распространенным минералом в шлиховых ореолах гипербазитовых массивов (Сидоров, 1987). В шлиховых пробах, отобранных нами на площади массива г. Солдатской, наибольшее количество аваруита отмечено в пробах из правого притока р. Белой (рис. 1). Из 2100 зерен аваруита, изученных на СЭМ, 20 зерен содержали микровключения платиноидов, максимальный размер которых 2 × 5 мкм. Состав микровключений следующий: Os, Os+Ir+Ru±As, Pt, Pt+Ir, Os+Ir+Pd+Pt, Ir+Pt+Os+Ru±As, Pd+Cd+Cu, Au+Ag+Pd, Au+Pt+Pd, Au+Ag. В одном из зерен аваруита наблюдалось включение кобальтпентландита, обогащенного Ru (до 10 вес.%), размером 10 × 7 мкм с микровключением иридиевого осмия (рис. 2а). Отмечено также микровключение состава (Fe,Ni)₄Sb с примесью Ru, Ir и Os. Размеры комплексных микровключений не позволяют количественно определить состав минеральных фаз, поскольку в анализ попадают элементы вмещающего аваруита, однако можно уверенно говорить о присутствии четырех различных платиноидов в некоторых точках (рис. 2б). В зернах аваруита, содержащих микровключения платиноидов и золота, часто присутствует примесь меди, иногда ореол меди в аваруите наблюдается вблизи или вокруг микровключения. Одно из зерен аваруита было «нашпиговано» микровключениями осмия размером 0.5–5 мкм (рис. 2д), такую структуру можно назвать «пудинговая» по аналогии с английским термином *puddingstone* (пудинговый камень). Кроме платиноидов в аваруитах отмечались включения различных сульфидов, самородной меди, вайрауита (FeCo) и динерита (Ni₃As), что в основном повторяет находки Р.М. Новакова с соавторами (2014), который описал включение самородного осмия и почти все эти минералы в зернах аваруита из рыхлых отложений левого притока р. Белой. Ранее Е.Г. Сидоров (1987) установил наличие примесей золота, платины и палладия в камчатских аваруитах. Наши исследования добавляют к материалам предшественников

разнообразие и комплексность фаз благородных металлов — совмещение в одном микровключении золота с несколькими платиноидами или совместное нахождение четырех платиноидов в одном зерне. Образование аваруита, самородных золота и меди и комплексных выделений платиноидов связывается с серпентинизацией и постмагматическими процессами восстановления металлов из сульфидных фаз (Новаков и др., 2015; Сидоров, 1987). Приуроченность микровывделений платиноидов к сульфидам подчеркивает магматический генезис последних, а микровывделения в аваруите и примесь платиноидов в самородной меди связаны, видимо, с происхождением этих фаз за счет первичных железо-никелевых и железо-медно-никелевых сульфидов, содержащих ЭПГ.

Самородная медь из шлиховых проб. Наблюдалась как в виде самостоятельных зерен неправильной формы, так и в сростаниях с аваруитом. В одном из зерен наблюдалось включение комплексного состава $\text{Cu} + \text{Pt} + \text{Au} + \text{Pd} + \text{Ni} + \text{Fe}$ (в разных точках включения соотношение металлов было разное, в основном $\text{Cu} > \text{Pt} > \text{Au} > \text{Pd}$, и $\text{Cu} > \text{Au} > \text{Pt} > \text{Pd}$ с переменным количеством Ni и Fe) размером 10×20 мкм (рис. 2e). Самородная медь содержит примесь никеля (обычно 3–5 вес.%) и железа (1–2 вес.%). В одном из зерен в меди наблюдались выделения халькозина. В сростке самородной меди с аваруитом наблюдалось микровключение гринокита (CdS) с примесью цинка (до 4.8 вес.%).

Таким образом, микровключения различных ЭПГ и золота были найдены нами в различных частях офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс — в мантийных перидотитах, кумулятивных породах и в эффузивах. Состав микровключений в изученных породах комплекса сходен, но свои особенности есть у каждой группы. Наиболее интересные комплексные включения обнаружены в сульфидных глобулах пикритов и в оливиновых клинопироксенитах.

Источники платиноидов в породах Камчатского Мыса. С точки зрения формационного анализа, перидотиты п-ова Камчатский Мыс принадлежат к альпинотипным гипербазитам (Хотин, Шапиро, 2006) или дунит-гарцбургитовой формации (Сидоров, 2009). Перидотиты этой формации не являются перспективными на поиски месторождений платины, они могут быть источником осмистого иридия в аллювиальных отложениях (Костоянов и др., 2000) и к ним могут быть приурочены россыпные месторождения золота, содержащие минералы ЭПГ (Сидоров, 2009). Наши данные частично подтверждают эти выводы. В частности находка лаурита в хромитите, микровключений чистого осмия, рутенистого и рутениридистого осмия в аваруитах

хорошо согласуется с такой минерагенической специализацией массива. Однако ряд признаков указывает на то, что офиолиты Камчатского Мыса имеют перспективы платиноносности: знаки платины в водотоках, дренирующих массив, самородки платины в аллювиальной россыпи золота вблизи массива (Tolstykh et al., 2009), находки сульфидов с выделениями медистой платины в вебстеритах в пределах массива (Новаков и др., 2014, 2015). Полученные нами данные добавляют в этот ряд находки микровключений сложного состава (3–4 платиноиды вместе, часто с преобладанием платины и присутствием золота) в сульфидах из пикритов и в оливиновых пироксенитах. Для объяснения этого противоречия может быть применена модель Д.П. Савельева (Савельев, Философова, 2014), согласно которой платиноносность некоторых пород офиолитового комплекса Камчатского Мыса связана с геодинамической обстановкой формирования массива — с влиянием глубинного мантийного плюма.

Крупные мантийные плюмы, такие как Гавайский, зарождаются на границе ядра и мантии, при этом к мантийным источникам добавляется вещество земного ядра, обогащенное серой (сульфидной фазой) и платиноидами. При зарождении плюма на этой границе его вещество может включать до 6% материала внешнего ядра (Boehler et al., 1995). Так, для базальтов плато Кергелен по содержанию в них ЭПГ рассчитано 0.3 или 1% (в зависимости от принятой модели) материала внешнего ядра в примитивном мантийном источнике (Chazey, Neal, 2005). Также по содержанию и соотношению ЭПГ путем моделирования процессов частичного плавления показано, что источник базальтов плато Онтонг-Джава включал до 0.5% материала внешнего ядра (Ely, Neal, 2003).

Влияние плюма сказывается также в повышенной температуре и, соответственно, в повышенных степенях плавления мантии, что способствовало переходу всей сульфидной фазы (концентрирующей платиноиды) в расплав. В экспериментальных работах последних лет значительно уточнены коэффициенты распределения ЭПГ между силикатной и сульфидной жидкостью, которые составляют 10^5 – 10^6 (Mungall, Brenan, 2014). Это означает, что распределение ЭПГ в магмах практически полностью контролируется содержанием их в различных сульфидах и поведением самих сульфидов. Для перидотитов Камчатского Мыса установлено экстремальное обеднение базальтовым компонентом, видимо, связанное с повышенными степенями плавления мантии в сегменте срединного хребта вблизи «горячей» точки (Батанова и др., 2014). О повышенных степенях плавления мантии при

влиянии мантийного плюма свидетельствует также наличие пикритов с плюмовыми характеристиками в составе вулканической части офиолитов (Савельев, 2014) и ультрадеплетированных расплавных включений в шпинелях из базальтов (Portnyagin et al., 2009). Такие условия плавления мантии при формировании магматических пород офиолитового комплекса Камчатского Мыса привели к тому, что почти вся масса ЭПГ и Au, растворенных в сульфиде, вместе с ним перешла из источника в расплав, что обогатило первичные магмы этими элементами. Более тугоплавкие платиноиды (осмий, иридий, рутений) частично попадают в расплав вместе с платиной и палладием, растворенными в сульфидной фазе, а частично остаются в мантийном рестите. Такая модель позволяет не только объяснить необычную платиноносность офиолитов Камчатского Мыса, но и дает перспективы обнаружения скоплений платиноносных сульфидов в отдельных частях комплекса. Наиболее вероятной зоной скопления сульфидов можно считать породы, переходные от гипербазитов к габбро, причем в телах, обогащенных кумулятивным оливином. Для поисков таких тел можно ориентироваться на состав шлиховых проб. При этом важно учитывать такие наблюдения: шлихи из водотоков, размывающих гипербазитовый массив г. Солдатской, содержат зерна аваруита в большом количестве, а шлихи из водотоков к северу и северо-западу от массива, в которых отмечена платиноносность, значительно беднее аваруитом (устное сообщение Л.П. Аникина). Это довод в пользу того, что источником платины являются не реститовые гипербазиты массива, а отдельное тело (или тела) кумулятивных пород.

Одним из методов, которыми может быть зафиксировано вещество земного ядра в источнике магм, является определение изотопного состава осмия. Косвенным доводом в пользу гипотезы о присутствии вещества ядра в породах офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс является более радиогенный (по сравнению с мантийным) состав осмия из минералов россыпи к северо-востоку от массива г. Солдатской (Костянов и др., 2000).

Иридием и другими ЭПГ обогащены углеродистые породы осадочной части офиолитового комплекса п-ова Камчатский Мыс (Savelyeva et al., 2015). Это обогащение связано в основном с эвксинными условиями во время накопления пород, а поставщиком ЭПГ в осадки могли быть синхронные осадконакоплению извержения или выведенные на поверхность дна глубинные части офиолитового комплекса.

Авторы выражают благодарность всем коллегам, принимавшим участие в совместных полевых работах на массиве г. Солдатской

в разные годы, прежде всего Р.М. Новакову, В.С. Успенскому и В.Ф. Богдановой. Спасибо Е.Г. Сидорову за плодотворное обсуждение многих спорных вопросов. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00546 и программы «Дальний Восток», проект № 15-1-2-045.

Список литературы

- Батанова В.Г., Лясковская З.Е., Савельева Г.Н., Соболев А.В.* Перидотиты п-ова Камчатский Мыс: свидетельство плавления океанической мантии вблизи горячей точки // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 12. С. 1748–1758.
- Бояринова М.Е.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Восточно-Камчатская. Лист 0-58-XXVI, XXXI, XXXII (Усть-Камчатск). СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2007.
- Бояринова М.Е., Вешняков Н.А., Коркин А.Г., Савельев Д.П.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд. 2-е. Серия Восточно-Камчатская. Лист 0-58-XXVI, XXXI, XXXII (Усть-Камчатск). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2007. 226 с. + 2 вкл.
- Костянов А.И., Ланда Э.А., Марковский Б.А. и др.* Особенности изотопного состава осмия минералов платиновой группы (МПГ) из россыпных проявлений Солдатского ультрамафитового комплекса (п-ов Камчатский Мыс, Восточная Камчатка) // Геохимия. 2000. № 10. С. 1127–1131.
- Новаков Р.М., Иванов В.В., Трухин Ю.П., Панова Е.Г.* Медно-никелевая и благороднометалльная минерализация в оливиновых вебстеритах п-ова Камчатский Мыс (Камчатка) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология. География. 2015. Вып. 4. С. 83–97.
- Новаков Р.М., Москалева С.В., Иванов В.В., Паламарь С.В.* Пентландиты и аваруиты гипербазитового массива горы Солдатской (п-ов Камчатский Мыс, Восточная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2014. № 2 (Вып. 24). С. 137–146.
- Осипенко А.Б., Конилов А.Н., Савельев Д.П. и др.* Геология и петрология амфиболитов полуострова Камчатский Мыс, Восточная Камчатка // Петрология. 2005. Т. 13. № 4. С. 421–448.
- Портнягин М.В., Савельев Д.П., Хёрнле К.* Плюмовая ассоциация меловых океанических базальтов Восточной Камчатки: особенности состава шпинели и родоначальных магм // Петрология. 2005. Т. 13. № 6. С. 626–645.
- Савельев Д.П.* Внутриплитные щелочные базальты в меловом аккреционном ком-

- плексе Камчатского полуострова (Восточная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С. 14–20.
- Савельев Д.П.* Меловые внутриплитные вулканы Восточной Камчатки: геологическая позиция и влияние на островодужный вулканизм // Геология и разведка. 2004. № 2. С. 16–19.
- Савельев Д.П.* Плагиоклазовые пикриты п-ова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 4. С. 43–53.
- Савельев Д.П., Философова Т.М.* Магматические сульфиды в пикритах п-ова Камчатский Мыс // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 120–126.
- Савельев Д.П., Философова Т.М.* Благородные металлы и интерметаллиды в сульфидах из меловых пикритов п-ова Камчатский Мыс // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 283–287.
- Сидоров Е.Г.* Платиноносность базит-гипербазитовых комплексов Корякско-Камчатского региона. Автореф. дис. докт. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2009. 46 с.
- Сидоров Е.Г.* Самородные никелевые металлы в гипербазитах // ДАН. 1987. Т. 295. № 6. С. 1456–1459.
- Федорчук А.В., Пейве А.А., Гулько Н.И., Савицев А.Т.* Петрохимические типы базальтов офиолитовой ассоциации полуострова Камчатский Мыс (Восточная Камчатка) // Геохимия. 1989. № 12. С. 1710–1717.
- Хотин М.Ю., Шапиро М.Н.* Офиолиты Камчатского Мыса (Восточная Камчатка): строение, состав, геодинамические условия формирования // Геотектоника. 2006. № 4. С. 61–89.
- Aulbach S., Mungall J.E., Pearson D.G.* Distribution and Processing of Highly Siderophile Elements in Cratonic Mantle Lithosphere // Review in Mineralogy and Geochemistry. 2016. V. 81. Iss. 1. P. 239–304.
- Barnes S.-J., Ripley E.M.* Highly Siderophile and Strongly Chalcophile Elements in Magmatic Ore Deposits // Review in Mineralogy and Geochemistry. 2016. V. 81. Iss. 1. P. 725–774.
- Boehler R., Chopelas A., Zerr A.* Temperature and chemistry of the core–mantle boundary // Chemical Geology. 1995. V. 120. Iss. 3–4. P. 199–205.
- Brenan J.M.* The platinum-group elements: «Admirably adapted» for science and industry // Elements. 2008. V. 4. № 4. P. 227–232.
- Chazey III W.J., Neal C.R.* Platinum-group element constraints on source composition and magma evolution of the Kerguelen Plateau using basalts from ODP Leg 183 // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. V. 69. Iss. 19. P. 4685–4701.
- Day J.M.D.* Hotspot volcanism and highly siderophile elements // Chemical Geology. 2013. V. 341. P. 50–74.
- Dilek Y., Furner H.* Ophiolites and Their Origin // Elements. 2014. V. 10. № 2. P. 93–100.
- Ely J.C., Neal C.R.* Using platinum-group elements to investigate the origin of the Ontong Java Plateau, SW Pacific // Chemical Geology. 2003. V. 196. Iss. 1–4. P. 235–257.
- Lorand J.-P., Luguet A.* Chalcophile and Siderophile Elements in Mantle Rocks: Trace Elements Controlled By Trace Minerals // Review in Mineralogy and Geochemistry. 2016. V. 81. Iss. 1. P. 441–488.
- Lorand J.-P., Luguet A., Alard O.* Platinum-group element systematics and petrogenetic processing of the continental upper mantle: A review // Lithos. 2013. V. 164–167. P. 2–21.
- Mungall J.E., Brenan J.M.* Partitioning of platinum-group elements and Au between sulfide liquid and basalt and the origins of mantle-crust fractionation of the chalcophile elements // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2014. V. 125. P. 265–289.
- Mungall J.E., Naldrett A.J.* Ore Deposits of the Platinum-Group Elements // Elements. 2008. V. 4. № 4. P. 253–258.
- Palme H.* Platinum-Group Elements in Cosmochemistry // Elements. 2008. V. 4. № 4. P. 233–238.
- Portnyagin M., Savelyev D., Hoernle K. et al.* Mid-Cretaceous Hawaiian tholeiites preserved in Kamchatka. Geology. 2008. V. 36. № 11. P. 903–906.
- Portnyagin M., Hoernle K., Savelyev D.* Ultra-depleted melts from Kamchatkan ophiolites: Evidence for the interaction of the Hawaiian plume with an oceanic spreading center in the Cretaceous? // Earth and Planetary Science Letters. 2009. V. 287. Iss. 1–2. P. 194–204.
- Savelyeva O., Palesskiy S., Savelyev D.* PGE in Carbonaceous Beds in the Cretaceous Carbonate-Siliceous Section of the Kamchatsky Mys Peninsula (Russia) // Goldschmidt Abstracts, 2015. P. 2779.
- Tolstykh N., Sidorov E., Kozlov A.* Platinum-group minerals from the Olkhovaya-1 placers related to the Karaginsky ophiolite complex, Kamchatskiy Mys peninsula, Russia // Canadian Mineralogist. 2009. V. 47. № 5. P. 1057–1074.
- Walker R.J.* Siderophile Elements in Tracing Planetary Formation and Evolution // Geochemical Perspectives. 2016. V. 5. № 1. 145 p.

МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ МИНЕРАЛОВ
**MICROINCLUSIONS OF PLATINUM GROUP ELEMENTS
MINERALS AND GOLD IN ROCKS
FROM OPHIOLITE COMPLEX IN THE KAMCHATSKY MYS PENINSULAR**

D.P. Savelyev, T.M. Filosofova

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, savelyev@kscnet.ru

The article presents the results of investigation of various rocks from ophiolite complex of the Kamchatsky Mys peninsular, as well as awaruite from stream sediment samples from streams draining the ultramafic massif of Mount Soldatskaya. Microinclusions of PGE and gold were revealed in sulphide globules from picrites, in lherzolites, olivine clinopyroxenites, chromitites as well as in awaruite and native copper grains from stream sediment samples using scanning electron microscopy. Au, Au+Ag, Pd₂Sn, Pt microinclusions and complex inclusions containing these elements and compounds with occasional As admixture were revealed in sulphides from picrites. Microinclusions in the olivine clinopyroxenites are represented mainly by Pt+Pd+Hg+Te+Cu±Ag, Cu+Pd+Pt+Te, Pt+Pd+Au+Ag+Te+Cu, As+Ir+Pt+Rh+Ru. Among the variety of microinclusions in awaruite, the authors revealed a grain stuffed with osmium microinclusions. A model that relates the platinum potential of ophiolite complex of the Kamchatsky Mys peninsular to its geodynamic situation was suggested. The complex composition of PGE microinclusions in the rocks is caused by the influence of mantle plume and possible admixture of the Earth's core material in magma sources.

Keywords: platinum group elements, ophiolite complex, Kamchatka, sulfides, awaruite.